

Zusammenfassung MT II

Näherungsformeln zur Impedanz: (i) $V \rightarrow I$: $r \approx \frac{1}{g}$ $x \approx -\frac{b}{g^2}$ für $g \gg |b|$ (ii) $I \rightarrow V$: $g \approx \frac{1}{r}$ $b \approx -\frac{x}{r^2}$ für $r \gg |x|$
 $r \approx \frac{2}{b^2}$ $x \approx -\frac{1}{b}$ für $|b| \gg g$ $g \approx \frac{1}{r^2}$ $b \approx -\frac{1}{r}$ für $|x| \gg r$

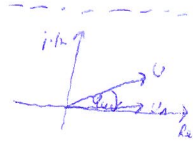
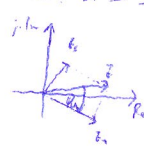
Leistungsbegriff: $P = P_{max}$ für $Z = Z_1^* = P_{1,max} = \frac{|U_1|^2}{8R_1}$

Prinzip der durchgehenden Wirkleistung:

Bei verlustloser Schaltung muss die in Verbraucher umgesetzte Wirkleistung jedes Klemmenpaars von links nach rechts durchströmen:

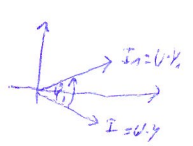
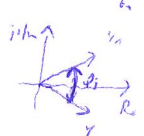
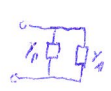
$$\left| \frac{U_V}{U_N} \right| = \sqrt{\frac{G_N}{G_V}} \quad \left| \frac{I_V}{I_N} \right| = \sqrt{\frac{R_N}{R_V}} \quad \left| \frac{U_{11} V}{U_{11} N} \right| = \sqrt{\frac{R_{11} V}{R_{11} N}}$$

Phasendrehung: (i) Serienschaltung:



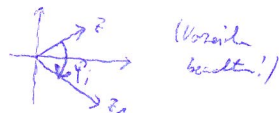
U_1 eff U um φ_U nach

(ii) Parallelschaltung:



I_1 eff I um φ_I voraus

[φ_I kann auch in Impedanz übergelesen werden:



(iii) Phasenschieber: $\varphi_U = \varphi_I$, $|U| = \text{const.}$, $|I| = \text{const.} \Rightarrow$ verlustlose Schaltung ohne Trafo d. Impedanz

Passive Schaltungsbausteine:

(i) $\frac{\infty}{j\omega}$ Gleichstromtrennung / HF-Abkoppung
 $\frac{\infty}{\omega}$ Drossel, HF-Trennung

(ii) Übertrager: $U_1 = U_2$ $I_1 = -\frac{1}{n} I_2$ $Z_1 = n^2 Z_2$ (ideal)



$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \text{ (kopp.)}$$



(iii) Resonanzkreise:

Resonanz bei $\text{Im}\{Z\} = 0$
 bei Parallel-/Seriell-Sk: $f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

Kreisgüte: Parallel-Sk: $Q_R = \frac{R_R}{X_L}$
 Seriell-Sk: $Q_R = \frac{X_L}{R_R}$

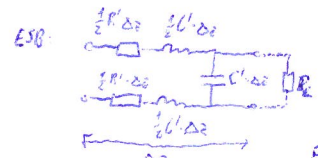
mit $Q_R = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_R C = \frac{1}{\omega_R L}$ und G_R ... Summe d. Verlustleitwerte (bei unbelasteter Güte: G_R/R_R ohne Lastwiderstand)
 mit $X_R = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_R L = \frac{1}{\omega_R C}$ und R_R ... Summe d. Verlustwiderstände

Perzentile Verteilung: $F = Q_R \left(\frac{f}{f_R} - \frac{f_R}{f} \right)$

Schmalbandnäherung: $F \approx Q_R \frac{2\Delta f}{f_R} = \frac{2\Delta f}{b_R}$ mit $\Delta f = f - f_R$

Bandbreite: $\frac{b_R}{f_R} = \frac{f_H - f_L}{f_R} \approx \frac{1}{Q_R}$

(iv) HF-Leitungen:



HF: $R' \Delta z \ll \omega L' \Delta z \Rightarrow$ bei hohen Leitungen ist R' vernachlässigbar

keine Trafo für $R_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = Z_0$... Wellenwiderstand

Phasendrehung: $\frac{\Delta \varphi}{\Delta z} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\omega \sqrt{L' C'}$... Phasendrehung (→ $\varphi = \varphi_0 - \beta \cdot z$)

• keine Reflexion, wenn Ende d. Leitung mit Z_L abgeschlossen ist.

• Verlustleistung: $dP = -\frac{1}{2} |I|^2 R' dz$ $\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{P} = -\frac{R'}{Z_0} dz = -\alpha dz \end{array} \right.$ mit $\alpha = \frac{1}{2} \frac{R'}{Z_0}$... Verlustkoeff. pro Längeneinheit
 • Transmittierte Leistung: $P = \frac{1}{2} |I|^2 Z_L$... und pro Transmittierter Leistung
 • bedämpfte Leitungsstelle: $U = U_0 \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}$ $\left[\frac{W}{m} \right] 1M \approx 8,08 \cdot 10^{-3}$

$$Z = \frac{U}{I}$$

Aktive Schaltungsbausteine:

(i) HF-Diode:

(a) Schottky-Diode: • Metall-HL-Übergang
 • nur n-HL (keine p-n-Übergang)
 • nur Mischungsstrom
 • keine Trägheitsphänomene durch Min.-Räume
 $i = I_0 (e^{\frac{U}{\varphi_0}} - 1)$ mit $\varphi_0 = \frac{kT}{q_0} \approx 25mV$

(b) Kapazitätsdiode: • werden in Sperrleitung betrieben

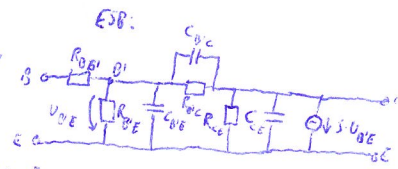


• Sperrspannung \rightarrow Sperrkapazität $\rightarrow C_0 V$

$$C_D = C_0 \left(1 + \frac{U}{\varphi_0} \right)^{-n} \quad (U(5V) \approx 0,7V \quad n \approx \frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2})$$

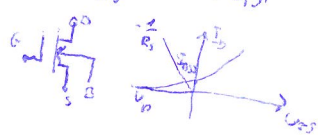
(c) Tunneliode: • Kombination aus Barium, in dem ein negative differentieller Widerstand auftritt
 • Verstärkung von Wechselströmen
 (z.B. Rattenkammer-Schalter)

ii) HF-Transistoren: (a) Bipolar-Transistor: $S \approx \frac{I_{C,sgl}}{U_T}$ $R_{B'E} \approx \frac{S}{2\pi f_T}$ mit f_T -Transitfrequenz ($\beta=1$)
 $\frac{1}{R_{B'E}} \approx \frac{S}{\beta_0}$ $\beta_0 = \frac{I_C}{I_B} \approx \frac{I_{C,sgl}}{I_{B,sgl}} = \beta$ (Hochstromerhöhung)



AP-Einstellung: $U_{E,sgl} \approx \frac{U_{Bet}}{3-6}$ $I_{C,sgl} \approx 10 \cdot I_{B,sgl}$

b) FET: n-Kanal-MOS-FET:



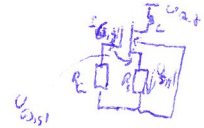
$I_D \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$ (quadratisch \rightarrow linear für Linearität)

$$S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \bigg|_{U_{GS,inst}} = \frac{2}{|U_P|} \sqrt{I_{DSS} I_D}$$

AP-Einstellung: $I_{C,sgl} \approx 0$

$$U_{G-S,sgl} = -U_{GS} = -I_{S,sgl} R_S$$

(sonst wie Bipolar-Schreiber)



HF-Verstärkung: Jeder Verstärker hat Bandpasscharakter:



$$\text{Betriebsleistungsverstärkung: } g_T = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{1}{2} |U_2|^2 R_2}{\frac{1}{2} |U_1|^2 R_1}$$

$$\text{Betriebsübertragungsfaktor: } A_B = \frac{U_2}{U_1} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = |A_B| e^{-j\phi_B} \quad \phi_B: \text{Betriebsphase} \quad a_B = -20 \lg |A_B| \text{ [dB]}$$

$$\text{Signal-Rausch-Verhältnis: } SNR = \frac{P_S}{P_R} \approx \text{const}$$

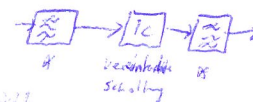
$$P_R = S_R \cdot B^{\text{Bandbreite}}$$

Konzepte: (i) Kaskade: mehrere Verstärkerstufen hintereinander:



Vorteil: einzelne Stufen können frequenzselektiv ausgelegt werden \rightarrow Signalverzerrungen (aufgrund d. Bandpasscharakteres) werden abgeschwächt \rightarrow nicht-lineare Verzerrungen gut beherrschbar
 es gilt: $b_{\text{Ges}} = b_k \sqrt{2^k - 1}$ bei n identischen Einzelverstärkern

(ii) Kaskade: mehrere Verstärkerstufen in 10's hintereinander:



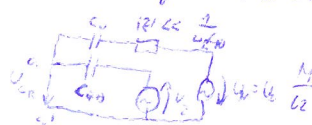
Vorteil: kompakte Schaltung mit hoher Verstärkung

Nachteil: nicht-lineare Verzerrungen können nicht unterdrückt werden, Intermodulationsprodukte verstärken sich

* mehrstufig (Bandpass lassen sich schlecht integrieren, deshalb Vorstufe & Nachstufe)

Resonanzverstärker: Verstärker mit je einem Resonanzkreis (im Raster) max. Verstärkung im Resonanzfall

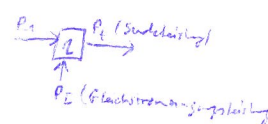
Verzerrung d. Grenzfrequenz-Kapazität:



$$C_N = \frac{C_1}{1 + C_1^2 L^2}$$

$$\text{Verstärkung: } g_T = \frac{45^2 P_i P_L}{4 (U_{GS} C_{GS} R_i)^2}$$

Leistungsverstärkung:



$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

idealisiertes 3-Port-Verstärkerschaltbild:

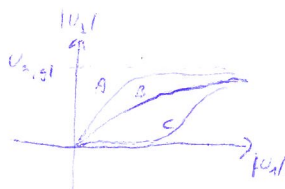


Betriebsarten: (i) A-Betrieb: AP in Mitte d. Kennlinie \rightarrow Überlagertes HF-Signal führt zu max. symmetr. Aussteuerung \rightarrow bei linearer Kennlinie keine Verzerrung

$$\left. \begin{aligned} P_I &= U_{C,sgl} \cdot I_{C,sgl} = U_{C,sgl} \cdot \frac{I_{max}}{2} \\ P_F &= \frac{1}{2} |U_2| |I_2| = \frac{1}{2} U_{C,sgl} \cdot \frac{I_{max}}{2} \end{aligned} \right\} \eta_{max} = 0,5 \text{ (bei fehlender Aussteuerung } Q=0!)$$

(ii) B-Betrieb: AP an flachen Rand d. Kennlinie \rightarrow positive Halbwelle d. Überlagerten HF-Signals führt zu max. Aussteuerung \rightarrow im Ausgangsstrom enthalten Oberschwingen keine Verlustleistung bei fehlender Aussteuerung

(iii) C-Betrieb: Nur Spitze d. positiven Halbwelle führt zu unisymmetr. Aussteuerung $\eta_{max} = 1$



- Strahlungs- & Empfangseigenschaften: Darstellung häufig in Polarkoordinaten (Orichtung: Hauptstrahlung in $\varphi=0^\circ$ und $\vartheta=90^\circ$)

z.B. für $\vartheta = \frac{\pi}{2}$: $G_\theta\left(\frac{\pi}{2}, \varphi\right) = \frac{|E(\varphi)|}{|E_{max}|} = \frac{|H(\varphi)|}{|H_{max}|}$... Sende-Richtcharakteristik

Reziprozität: $G_T = G_R = G$ ebenso: $C_T = C_R = C$; $C_\theta = \frac{|E(\vartheta, \varphi)|}{|E_{max}|}$ Sende-Richtcharakteristik
 $G_T = G_R = D$ (Antennen sind üblicherweise reziprok) $C_R = \frac{|U(\vartheta, \varphi)|}{|U_{max}|}$ Empfangs-Richtcharakteristik

• $A_0 = q \cdot A_j$ mit q - Flächenwirkungsgrad

• Freiraumübertragungsverlust: $P_{r, \text{max}} = P_e \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$

• Spiegelantennen: Umwandlung sphärischer Phasenfronten einer punktförmigen Strahlungsquelle in ebene Wellenfronten
 \hookrightarrow konstante Phase

• Wellenausbreitung: $h \uparrow \rightarrow S_{\text{eff}} \downarrow \rightarrow E \downarrow \Rightarrow$ Brechung ^{elektr.} Wellen in den dichteren Medium \rightarrow Richtung Erde gebrochen
 \hookrightarrow Radiohorizont $>$ geometrischer Horizont (Annahme: $\frac{4}{3} r_{\text{Erde}}$)

• Wellenleiter (3-30 MHz): Bodenhalle: alle Wellenanteile, die sich in Bodenhalle auf relativ kurzer direktem Weg vom Sender zum bodennahen Empfänger ausbreiten.

Kanäle: alle Wellenanteile, die über eine / mehrere Reflexionen an der Ionosphäre ("Hops") zum Empfänger ankommen.

(i) Hertzian-Sender:

• Senderkonzept: V - Sendesignal wird direkt (bis auf F-Verzerrung) erzeugt und verschickt \rightarrow alle Komponenten müssen F-verzerrt sein

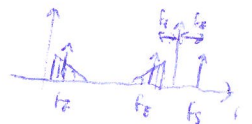
(ii) Überlagerungsprinzip: Signalaufbereitung erfolgt bei hoher Zwischenfrequenz und dem resultierenden Sendesignal bei der niedrigen Sendefrequenz wird durch Mischung mit LO-Signal variierende Frequenzen erzeugt.
 Vorteil: Signalaufbereitung in ZF einfacher, besser, billiger
 Nachteil: Lineare Mischung erforderlich

• Empfängerkonzepte: (i) Geradenkanalempfänger: analog Geradenkanalsender: direkte Verstärkung d. HF-Signals

(ii) Überlagerungsempfänger (Super-Heterodyn): HF-Signal variabler Frequenz wird über einstellbaren Lokaloszillator auf feste Zwischenfrequenz umgesetzt und dann weiterverarbeitet

(iii) Doppel-Super-Heterodyn: 1. ZF hoch (Sprunghäufigkeit)
 2. ZF niedrig (Verstärkung, Selektion)

(iv) Homodyn-Empfänger: homodyn: $ZF = 0$
 Synchro: LO und RF sind phasensynchron geschaltet
 Quadratur: I und Q Empfangskanäle



• Rauschen: Thermisches Widerstandsrauschen: $|U_n|^2 = 4kTRB$... Rauschspannung

• Verfügbare Rauschleistung:

• Verstärkergerausch:

$P_{N, \text{max}} = kTB_0$
 $\Rightarrow F = \frac{T_0 + T_2}{T_0} = 1 + \frac{T_2}{T_0}$ mit F_2 ... zusätzlicher Rauschanteil
 T_2 ... x Rauschleistungsmaß

• Signal-Rausch-Verhältnis: $\frac{P_{S2}}{P_{N2}} = \frac{|U_s|^2}{8R_s k(T_0 + T_2)B}$ S/N-Abstand: $10 \lg \frac{P_S}{P_N}$

• Bei Antennen kann Empfang von Störstrahlung durch Rauschleistungsmaß erfasst werden

• Reflektor: Impedanz: $r = \frac{Z}{Z_0}$ (r - Laufzeit zum Ziel und zurück) Richtgleichung: $P_{r, \text{max}} = \frac{5 \cdot G^2 \cdot A_0^2}{(4\pi)^3 r^4} P_{\text{Lo}}$